

基于零序电压调控的配电网对地 泄漏电阻测量技术

白 浩¹, 欧阳健娜², 潘姝慧¹, 吴丽芳², 袁智勇¹

(1. 中国南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘 要: 由于大多数传统的配电网对地参数测量方法主要针对配电网对地电容的准确测量, 而对地泄漏电阻测量并不精确, 且无法消除对地参数测量过程中的消谐电阻和电压互感器内阻抗产生的影响, 致使测量结果误差较大; 同时, 传统测量方法不能广泛适用于不同系统接地方式情况, 实际应用较为不便。为此, 提出一种基于零序电压调控的配电网对地泄漏电阻测量方法, 选择配电网外接特制的带有分接抽头的 Y/ Δ 接线接地变压器上合适的分接抽头接地, 获得一个较小的零序电压, 并测量出此时的系统零序电流, 将所得电压和电流值通过运算得到系统对地泄漏电阻。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对提出的对地泄露电阻测量方法进行仿真验证分析, 所得测量结果误差小, 且适用于不同的系统接线方式, 表明了该方法测量精度高, 适用性广, 且安全经济, 使用便捷。

关 键 词: 配电网对地泄露电阻; 分接抽头; 接地变压器; 开口三角电压互感器; 零序电流互感器

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.015 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2022)03-0126-07

Measurement technology of grounding leakage resistance of distribution network based on zero sequence voltage regulation

BAI Hao¹, OUYANG Jianna², PAN Shuhui¹, WU Lifang², YUAN Zhiyong¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Science Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: As most of the traditional measurement methods for the ground parameters of distribution network are mainly focus on the accurate measurement of the grounding capacitance, the grounding leakage resistance measurement is not accurate. The influence of the harmonic elimination resistance and the internal impedance of the voltage transformer is impossible to be eliminated during the measurement of the ground parameters. The issues mentioned above may result in a large error in the grounding leakage resistance measuring result. Furthermore, traditional measurement methods cannot be widely applied to different system grounding methods, and practical application is relatively inconvenient. To this end, this paper proposes a method for measuring the grounding leakage resistance of distribution network based on zero-sequence voltage regulation. In the proposed method, a small zero sequence voltage is obtained by selecting the appropriate shunting tapon a special Y/ Δ -connected grounding transformer with shunting taps in the distribution network to ground. The corresponding zero sequence current of the system is measured. The grounding leakage resistance of the system can be calculated through the obtained voltage and current values. The PSCAD/EMTDC simulation software is used to verify and analyze the proposed grounding leakage resistance meas-

收稿日期: 2021-05-16; 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 广西电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20190061)

通信作者: 白 浩(1987-), 男, 博士, 工程师, 主要从事配电自动化、主动配电网、人工智能应用研究; E-mail: baihao@csg.cn

urement method. The simulation results show that the calculation method is applicable to different system connection mode with small measuring error, which indicates that the proposed method has the advance of high measurement accuracy, wide applicability, safety, economy and convenient use.

Key words: grounding leakage resistance of distribution network; shunting tap; grounding transformer; open delta voltage transformer; zero sequence current transformer

目前,中国的中低压配电网投入运行方式大多数采用中性点非有效接地^[1]。系统发生单相间歇性电弧接地故障的概率较高,若故障点对地间歇性电流较大,则该电流不易熄灭。由于暂态过程中的积累效应,系统中易产生间歇性电弧过电压,进而危及到设备绝缘,且电弧燃熄过程中极易导致相间故障,并扩大故障范围,此时需装设消弧线圈抑制故障接地电流^[2-3]。配电网对地参数包括对地电容及对地泄漏电导^[4-5],传统消弧线圈仅能补偿接地电流中占比较大的电容电流,而无法对泄漏电流进行抑制。然而,由于中国配电网不断地持续发展,用电量随之持续增长。同时,电缆线路在配电网中的应用也更为广泛,各种因素使得配电网对地泄漏电阻增大。当发生单相接地故障时,接地电流中包含的泄漏电流随之增大,单纯使用传统消弧线圈无法有效地抑制泄漏电流,导致接地电流仍较大,引起故障点燃弧^[6]。对地泄漏电阻的测量能够反映系统对地绝缘情况,以保证系统的安全,因此配电网对地泄漏电阻的精准测量在实际应用中有着重要的意义。

现场常用的方法中,全电流补偿消弧线圈可以分别对电容电流和泄漏电流进行有效地补偿和抑制故障过电压,其补偿容量及作用效果主要依赖于对配电网对地电容及对地泄漏电导测量的精确程度^[7]。配电网有源消弧技术同样对对地参数的测量精度有所要求^[8],这些方法中对地泄漏电阻测量的精度是不可忽视的一部分。由于传统对地参数测量方法在测量对地电容方面已进行较多研究,因此对地泄漏电阻的测量成为对地参数测量技术中的难点。

目前国内外对于配电网对地参数测量方法的研究多种多样,文献[9]提出了一种实时测量中性点不接地配电网电容电流的单频率测量法,该方法利用从电压互感器开口三角侧注入的一个恒流信号和测得的互感器非一次侧的两侧相电压计算得到配电网对地电容,可以避免互感器内阻抗对参数测量的影响^[10],但该方法仅能计算配电网对地电容值,无法

计算对地泄漏电阻,测量产生的对地参数误差较大,在配电网有源消弧等故障处理技术中无法有效地应用。向配电网注入电压互感器开口侧注入 2 个频率不同的电流信号并测量其返回电压信号^[11]和注入 3 个不同频率电流信号并测量开口三角侧电压幅值的方法^[12],称为双频法和三频法,其参数运算量较为庞大,且精确度受到注入信号频率的影响大,如果降低注入信号频率,会导致对地泄漏电流测量误差增大,将无法精确测量配电网对地泄漏电阻,不能较好地投入运用。改进扫频法^[13]测量对地参数虽然运算简单,但测量耗时较长,且不能对对地泄漏电阻进行测量。文献[14-15]采用双电压互感器测量对地参数的方法,利用双电压互感器构成特征信号的循环回路以实现实时测量,但只用于中性点不接地配电网,其适用范围有所局限。

本文首先提出基于零序电压调控的配电网对地泄漏电阻测量技术,通过选择将合适的接地变压器系统侧绕组分接抽头接地来调控系统零序电压,所选择的分接抽头需要保证该零序电压不会对系统造成冲击,通过开口三角电压互感器测量得到其电压值;同时,用零序电流互感器测量所有馈线的零序电流,由零序电压和零序电流计算得到配电网对地泄漏电阻;最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真系统对该方法进行仿真验证分析其可靠性。该方法可以有效地消除消谐电阻以及零序电压互感器内阻抗对配电网对地泄漏电阻测量过程产生的影响,增强测量数据精度和可靠性,并使零序电压互感器测量过程中不受配电网接地方式的影响,适用范围得以扩大,实现了配电网对地泄漏电阻的精确测量的同时弥补了现测量方法在测量对地泄漏电阻方面的不足。

1 对地泄漏电阻精确测量方法

1.1 对地泄漏电阻精确测量方法原理

经典中性点非有效接地配电网如图 1 所示,通

过该配电网对基于零序电压调控的配电网对地泄漏电阻测量原理进行分析。图1中, \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为非有效接地配电网三相电源电势, C 为非有效接地配电网单相对地电容, r 为非有效接地配电网单相对地泄漏电阻, 系统经接地变压器人为引出一中性点 O , 通过开关 S_1 的开闭改变其接地方式, S_1 断开表示系统采用中性点不接地方式, S_1 闭合则表示中性点经阻抗 Z 接地, 改变阻抗 Z 的值, 又可以代表中性点经小电阻接地方式和中性点经消弧线圈串电阻接地方式 2 种系统运行状态。 A_Y 、 B_Y 、 C_Y 均为 Y/ Δ 接线接地变压器系统侧绕组, 该侧绕组的首端直接与非有效接地配电网的三相线路相连, 设置各相绕组上均匀地分布有多个接地分接抽头, 每相绕组线圈总匝数为 N , 每相绕组的分接抽头数量为 k , 其档位按从系统中性点至馈线出口的顺序递增进行编号为 1、2、 \dots 、 k , 则各分接抽头到中性点的这一段绕组所对应的线圈匝数依次为 N_1 、 N_2 、 \dots 、 N_k 。 S_2 为接地开关, 各相绕组分接抽头都引接至 S_2 , 通过 S_2 来控制合适的分接抽头接地。 a_Δ 、 b_Δ 、 c_Δ 为接地变压器低压侧绕组。

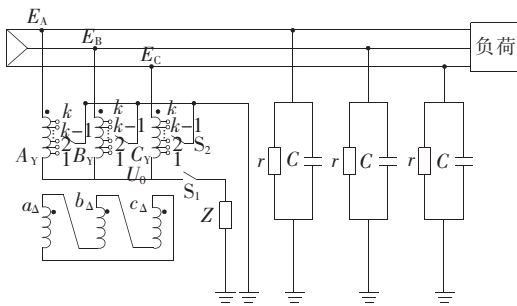


图1 基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄漏电阻测量原理

Figure 1 Schematic diagram of grounding leakage resistance measurement for non-effectively grounded distribution network based on zero sequence voltage regulation

调节接地变压器系统侧某相绕组对应的任一分接抽头 x 接地, 中性点位移电压 U_0 将随接地档位的变化产生相应的改变, 电压变化的幅度取决于调节的接地档位所对应的匝数 N_x 的变化情况, 但电压相位一直保持不变。

将该分档调压接地变压器视为一个三绕组变压器^[16], 令接地变压器系统侧匝数为 N , 则可定义系统侧到接地变压器接地档位点为 1 号绕组, 漏抗为

$x_{1\sigma}$, 匝数为 $(1-\alpha)N$, 其中 α 定义为接地变短路绕组匝数与高压侧绕组匝数之比, 其取值范围为 $[0, 1]$; 定义接地变压器绕组经分接抽头接地部分绕组为 2 号绕组, 漏抗为 $x_{2\sigma}$, 匝数为 αN ; 接地变压器低压侧定义为 3 号绕组, 漏抗为 $x_{3\sigma}$, 规定其匝数为 N' 。

因将接地变压器等效为三绕组变压器, 可以通过变压器绕组内部接地公式得到接地变压器各绕组漏抗表达式为

$$x_{1\sigma} = \omega(1-\alpha)N^2 \left(\frac{S}{\rho L} - \alpha\lambda_0 \right) \quad (1)$$

$$x_{2\sigma} = \omega\alpha N^2 \left[(\alpha-1)\lambda_0 + \frac{S}{\rho L} \right] \quad (2)$$

$$x_{3\sigma} = \omega(1-\alpha)^2 N^2 \left(\frac{S}{\rho L} - \lambda_0 \right) \quad (3)$$

式(1)~(3)中 ω 为角频率; λ_0 为铁芯磁导; S 为磁阻的截面积; ρ 为漏磁通通过磁路的磁阻率; L 为磁路长度。

大多数情况下接地变压器的绕组电阻远小于其漏抗值, 由此可得到其对地短路支路总零序阻抗为

$$Z_{T0} = x_{1\sigma} + \frac{x_{2\sigma}x_{3\sigma}}{x_{2\sigma} + x_{3\sigma}} \quad (4)$$

由于短路绕组占比 α 的变化与接地变压器接地档位的调节程度成正比关系, 可以将 α 作为式(1)~(3)中的自变量, 其定义域即为 α 的取值范围 $[0, 1]$ 。在该定义域下, 随着短路绕组占比 α 的增大, 即调节接地变接地档位增加, 漏抗 $x_{1\sigma}$ 与 $x_{3\sigma}$ 单调递减, 而 $x_{2\sigma}$ 单调递增。由式(4)可知, 接地变压器接地支路的总零序阻抗 Z_{T0} 将随之减小, 这将导致系统零序电流增加。由于同一配电网接地方式下中性点接地阻抗 Z 的阻抗值不会发生变化, 则接地变压器中性点位移电压随零序电流的增加而增大。

由于在调节接地档位进行对地泄漏电阻测量的过程中, 应满足中性点位移电压不超过电力系统运行规程的允许范围的要求, 这是为了保证配电网三相基本平衡, 不会给电力设备造成较大损害, 也不会对系统安全稳定运行造成潜在威胁或导致因中性点位移电压过高而造成的保护装置误动。因此, 在进行对地泄漏电阻测量时, 需要避免接地档位太大而导致接地变压器的中性点电压过大的情况, 应选取接地变压器最低档位分接抽头来接地, 产生的中性点位移电压也会很小。

基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄露电阻测量等效电路如图 2 所示。图 2 中, \dot{E}_{com} 为接地变压器系统侧某相绕组调节分接抽头接地时的开路电压, Z_{T0} 为接地变压器对地短路支路总零序阻抗, C 为中性点非有效接地配电网单相对地电容, r 为中性点非有效接地配电网单相对地泄露电阻, 则可知配电网对地泄露电阻实际值为 $r/3$ 。 \dot{U}_0 为零序电压, 应用开口三角电压互感器测量得到归算到一次侧的电压值。 \dot{I}_0 为零序电流, 应用现有配电网自动化设备(如馈线终端单元, 零序电流互感器)测量得到其归算至一次侧的值。

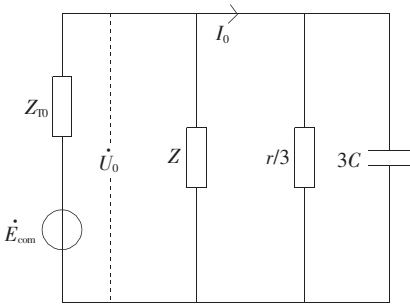


图 2 基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄露电阻测量等效电路

Figure 2 Equivalent circuit diagram of grounding leakage resistance measurement for non-effectively grounded distribution network based on zero sequence voltage regulation

根据图 2 所示的对地参数测量等效电路, 通过调节接地变压器系统侧绕组分接抽头接地产生一个较小的零序电压 \dot{U}_0 和对应的零序电流 \dot{I}_0 , 将两者作商可得配电网对地导纳 Y_0 表达式为

$$Y_0 = \frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} = \frac{3}{r} + j\omega 3C \quad (5)$$

可以得到非有效接地配电网的对地泄露电阻运算表达式为

$$\sum R = 1/\text{Re}(\dot{I}_0/\dot{U}_0) \quad (6)$$

泄露电流为

$$I_R = U_\varphi / \sum R \quad (7)$$

式(5)、(7)中 ω 为配电网频率; U_φ 为配电网相电压。

1.2 测量方法的具体步骤

基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄露电阻测量技术流程如图 3 所示。首先选择接地变

压器系统侧绕组分接抽头的最小档位接地, 得到一个较很小的中性点位移电压, 随后通过开口三角电压互感器将归算到一次侧的零序电压值 \dot{U}_0 测量出来; 然后, 利用零序电流互感器测量得到系统全部馈线归算到一次侧的零序电流值 \dot{I}_0 ; 最后, 利用式(6)表示的零序电压和零序电流两者之间的关系, 可以计算出系统对地泄露电阻值, 实现配电网对地泄露电阻的精确测量。该测量方法通过配电网接地变压器系统侧分接抽头的最小档位接地, 产生很小的零序电压, 规避了零序电压过大对系统造成冲击和保护误动的风险, 不影响配电网正常运行, 测量过程安全可靠。同时有效地规避了测量对地泄露电阻过程中造成的测量误差, 实现对地泄露电阻的精准测量。

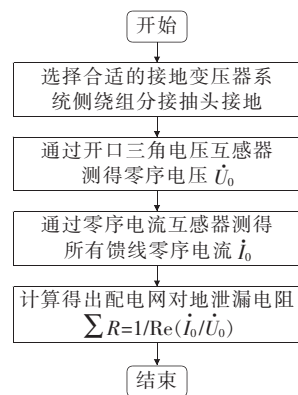


图 3 基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄露电阻测量流程

Figure 3 Flow chart of measurement of grounding leakage resistance in non-effectively grounded distribution network based on zero sequence voltage regulation

2 仿真分析

2.1 仿真模型的搭建

如图 4 所示, 在 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建的 10 kV 非有效接地配电网模型并进行仿真分析, 以验证本文所提测量技术的有效性。模型中包含一条架空线路和一条电缆线路, 作为对实际配电网不同种类馈线的模拟分析; 同时在母线上接有一系统侧各绕组均匀分布有多个分接抽头的接地变压器, 引出一个中性点, 而系统侧绕组上的各个分接抽头分别通过引出线引接至接地开关 S_2 处, 以 S_2 调节抽头接地。非有效接地配电网馈线仿真参数如表

1所示。通过将该配电网仿真模型的接地开关 S_1 断开,模拟配电网中性点不接地方式。在 $t=0.1$ s 时,控制接地变压器 C 相系统侧绕组上的最低档位分接抽头通过接地开关 S_2 引出接地,图 5 表示系统零序电压变化情况。

由图 5 可知,接地变分接抽头档位接地后产生的零序电压远小于 10 kV 配电网对地电压,对系统

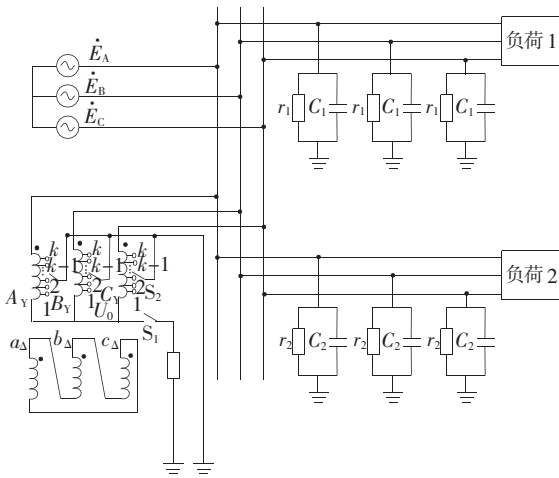


图 4 基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄漏电阻测量仿真

Figure 4 Simulation diagram of grounding leakage resistance measurement for non-effectively grounded distribution network based on zero sequence voltage regulation

表 1 馈线仿真参数

Table 1 Feeder simulation parameters

馈线	线路种类	线路长度/km	阻尼率 $d/\%$	泄漏电阻/k Ω
L ₁	架空	9	2.5	38.611
L ₂	电缆	15	1.5	22.124

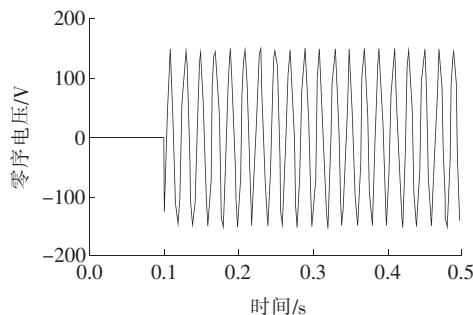


图 5 中性点不接地配电网零序电压变化情况

Figure 5 Variation of the zero sequence voltage in neutral point ungrounded distribution network

三相电压的对称性影响很小,三相基本平衡,零序电压的变化在电力系统运行规程的允许范围之内,不会给电力设备造成较大损害,保证了配电网的安全稳定运行,确保该方法实行可靠。

2.2 不同接地方式下对地泄漏电阻测量分析

为模拟配电网中性点经消弧线圈接地方式,将接地开关 S_1 闭合,此时中性点通过以可调消弧线圈接地。先调节消弧线圈阻抗值以确定此时脱谐度为 5%,调节接地变压器 C 相系统侧绕组上的最低档位分接抽头通过接地开关 S_2 引出接地,并利用测得的零序电压以及零序电流计算得出在该脱谐度下中性点非有效接地配电网的对地泄漏电阻数据,如图 6 所示,表示中性点非有效接地配电网在脱谐度为 5% 情况下对地泄漏电阻变化情况。保持同一接地档位接地,改变消弧线圈阻抗值,使其脱谐度分别为 5%、8%、10%、100% (其中,脱谐度 100% 则表示 S_1 断开的情况,以模拟配电网中性点不接地方式),并将测得的配电网对地泄漏电阻数据统计如表 2 所示。

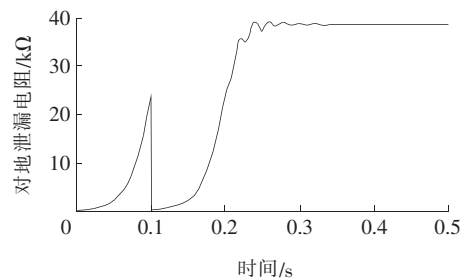


图 6 脱谐度为 5% 的非有效接地配电网对地泄漏电阻变化情况

Figure 6 Changes of the grounding leakage resistance in non-effectively grounded distribution network with a detuning degree of 5%

表 2 同一接地档位不同脱谐度下对地泄漏电阻测量结果
Table 2 Measurement results of grounding leakage resistance under the same grounding tap with different detuning degrees

脱谐度/ %	泄漏电阻/k Ω		相对误差/ %
	实际值	测量值	
5	14.064	14.064	0.00
8	14.064	14.065	0.01
10	14.064	14.069	0.04
100	14.064	14.063	-0.01

由表 2 可知,在不同的脱谐度下,对地泄露电阻测量误差都控制在 0.05% 以内,满足配电网对地参数测量精度要求,验证了该对地泄漏电阻测量技术的精确性;同时,证明该方法不受配电网中性点接地方式影响,适用范围更广,运用可靠性较高。

2.3 不同接地档位对地泄漏电阻测量分析

断开接地开关 S_1 ,使配电网处于中性点不接地方式下,不改变配电网对地泄漏电阻值,在接地变压器系统侧 C 相绕组上设置 5 个不同的接地档位分接抽头 T_1 至 T_5 ,其顺序从位于中性点侧的最低档位往系统侧依次增加。调节接地变压器 C 相系统侧绕组不同分接抽头接地,得到不同接地档位下的零序电压和对地泄漏电阻数据如表 3 所示。由表 3 可知,随着接地档位增加,零序电压随之增大,但并未超过电力系统运行规程的允许范围,不会对系统安全可靠运行产生潜在威胁;同时,调节不同接地档位接地测量得到的对地泄漏电阻结果误差仍然满足配电网其测量精度的要求,验证了该方法测量的可靠性。

表 3 不同接地档位下对地泄漏电阻测量结果

Table 3 Measurement results of grounding leakage resistance under different grounding taps

接地档位	零序电压/V	泄漏电阻/k Ω		相对误差/%
		实际值	测量值	
T_1	83	14.064	14.064	0.00
T_2	150	14.064	14.063	-0.01
T_3	220	14.064	14.055	-0.06
T_4	289	14.064	14.067	0.02
T_5	360	14.064	14.067	0.02

3 结语

针对传统配电网对地参数测量技术中对于对地泄漏电阻准确测量研究的不足,并为解决传统方法中无法消除对地参数测量过程中的消谐电阻和电压互感器内阻抗产生的影响的问题和适用范围受接地方式局限的困扰,本文提出了基于零序电压调控的非有效接地配电网对地泄漏电阻测量技术,利用配电网外接特制的带有分接抽头 Y/ Δ 接线接地变压器,通过让合适的接地变压器分接抽头接地,改变并

通过开口三角电压互感器测量得到配电网零序电压,同时利用馈线终端单元零序电流互感器测量出所有馈线的零序电流,以对地参数支路的电压和电流运算得出配电网对地泄漏电阻。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建非有效接地配电网模型进行仿真分析,验证了该技术的精确性和可靠性,且在测量过程中其确保了产生的零序电压并未超过电力系统运行规程的允许范围,不会危害电力设备安全和系统安全稳定运行。同时,该技术不受配电网中性点接地方式的影响,适用范围更加广泛,具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力配电网谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009:34-36.
- [2] 郭丽伟,薛永端,徐丙垠,等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术,2015,39(8):2340-2345.
GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology,2015,39(8):2340-2345.
- [3] 陈洁羽,左宝峰,谈震,等. 配电网单相接地快速处置装置运行情况研究[J]. 智慧电力,2022,50(2):75-81.
CHEN Jieyu, ZUO Baofeng, TAN Zhen, et al. Operation analysis of rapid disposal device for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Smart Power,2022,50(2):75-81.
- [4] 李晓波,陈义刚,陈文斌,等. 基于小波和深度学习的配电网单相接地故障辨识[J]. 电测与仪表,2021,58(4):115-120.
LI Xiaobo, CHEN Yigang, CHEN Wenbin, et al. Identification of single-phase grounding fault in distribution network based on wavelet and deep learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(4):115-120.
- [5] 刘维功,薛永端,徐丙垠,等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. 电网技术,2014,38(7):2008-2013.
LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An active arc-suppression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. Power Sys-

- tem Technology, 2014, 38(7):2008-2013.
- [6] 王巍璋, 王淳, 尹发根. 基于可达矩阵和贝叶斯定理的含分布式电源的配电网故障区段定位[J]. 中国电力, 2021, 54(7):93-99+124.
WANG Weizhang, WANG Chun, YIN Fagen. Reachability matrix and bayes' theorem based fault section location of power distribution network with distributed generation[J]. Electric Power, 2021, 54(7):93-99+124.
- [7] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5):128-133.
CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Active arc-suppression method based on double closed-loop control under single-phase grounding faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5):128-133.
- [8] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16):137-143.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing and feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):137-143.
- [9] 孔祥平, 李鹏, 徐凯, 等. 直流线路故障再启动功能与换流变中性点偏移保护配合策略分析[J]. 高压电器, 2022, 58(3):155-162.
KONG Xiangping, LI Peng, XU Kai, et al. Coordination strategy analysis between the DC line failure recovery function and neutral shifting protection of converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3):155-162.
- [10] 李卫丰, 王超, 薛永端, 等. 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23):1-10.
LI Weifeng, WANG Chao, XUE Yongduan, et al. A flexible DC distribution network line unipolar grounding protection method based on transient power direction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23):1-10.
- [11] JIANG Nan, LI Suichao, WANG Lu, et al. A new method of measuring capacitance current in non-effective grounding power system[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, China, 2016, 489-492.
- [12] 李一博. 基于柔性全补偿消弧装置的配电网对地电容电流测置技术研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [13] 郑康霖, 耿增玮, 王红霞, 等. 基于同步量测大数据的配电网单相接地故障检测及定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9):50-56.
ZHENG Kanglin, GENG Zengwei, WANG hongxia, et al. Single-phase grounding fault detection and localization based on big data from synchronized phasor measurement[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9):50-56.
- [14] 曾祥君, 卓超, 喻锟, 等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5):1523-1534.
ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5):1523-1534.
- [15] 卓超, 曾祥君, 喻锟, 等. 基于双电压互感器的中性点不接地配电网对地参数实时测量新技术[J]. 电网技术, 2020, 44(7):2657-2664.
ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A novel real-time measurement technique of grounded parameters of dual voltage transformers in neutral point ungrounded distribution networks [J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2657-2664.
- [16] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004:35-38.